

University of Groningen

## LOFAR Epoch of Reionization

Patil, Ajinkya Hanmant

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2016

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Patil, A. H. (2016). *LOFAR Epoch of Reionization: Statistical methods and first results*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.



# Samenvatting

Sterrenkundigen willen de puzzel van de geschiedenis van het heelal oplossen, maar een belangrijk puzzelstukje ontbreekt nog steeds. Tot nu toe bestaan er geen waarnemingen van de tijdsperiode waarin de eerste (oudste) sterren zijn ontstaan. Hierdoor kunnen we talrijke vragen niet beantwoorden, zoals wanneer zijn de eerste sterren ontstaan en hoe zagen ze eruit? Mijn onderzoek richt zich op het beantwoorden van deze vragen. Hiervoor willen we de radiosignalen detecteren die uitgestraald werden tijdens de formatie van de eerste sterren. Deze radiosignalen zijn vergelijkbaar met signalen van FM radio en mobiele telefoons, maar ze werden 13 miljard jaar geleden uitgestraald. In dit proefschrift presenteer ik zowel technieken om deze zwakke signalen te detecteren als de eerste resultaten van waarnemingen.

## De kosmologische context

Sterrenkundigen hebben vastgesteld dat ons universum steeds verder uitdijt. Het eerste bewijs hiervoor zijn waarnemingen uit het begin van de 20e eeuw die aantonen dat de meeste sterrenstelsels zich van ons af bewegen. Deze uitdijing heeft als consequentie dat hoe verder we terug in de tijd kijken hoe kleiner het universum was. Op een bepaald moment moet het universum dan een punt zijn geweest. Deze beginfase waarin het universum oneindig klein, dicht en enorm heet was, wordt de Big Bang genoemd. Een veelbelovend bewijs voor de oerknaltheorie kwam in 1963 met de ontdekking van kosmische achtergrondstraling. Deze straling is een overblijfsel van de oerknal.

---

**Dankwoord:** De auteur worstelt nog met de finesses van de Nederlandse taal. Hij wil Jorrit Hagen en Hein Vrugink hartelijk bedanken, niet alleen voor het bijschaven van deze samenvatting maar ook voor hun jarenlange taalondersteuning waardoor de auteur deze tekst zelf heeft kunnen schrijven.

In de afgelopen eeuw hebben we ook ontdekt hoe het universum op microschaal werkt. Atomen zijn bouwstenen van materie. Een atoom is neutraal, dat wil zeggen dat een atoom geen elektrische lading heeft. De reden hiervoor is dat een atoom uit een positief geladen kern en negatief geladen elektronen bestaat. Een energierijk elektron kan echter het atoom verlaten, bijvoorbeeld bij hoge temperaturen. Dit proces heet ionisatie.

Door de hoge temperatuur in de beginfase van het universum was materie geïoniseerd. In de loop der tijd koelde het universum echter vanwege de uitdijning af. Een kwart miljoen jaar na de oerknal was de temperatuur zodanig gedaald dat elektronen zich met atoomkernen verenigden. Zo werd neutrale materie gevormd, die vervolgens samenklonterde door de zwaartekracht. Zodra er genoeg materie was geaccumuleerd, begonnen zich de eerste sterren en sterrenstelsels te vormen. De straling van deze eerste sterren veroorzaakte reïonisatie van materie in het universum. Dit tijdperk waarbij elektronen de atomen weer verlaten, heet ‘the Epoch of Reionization’ (EoR) en vormt het centrale thema van dit proefschrift. Door het bestuderen van reïonisatie hopen we veel belangrijke vragen in de sterrenkunde te beantwoorden, zoals wanneer en hoe zijn de eerste sterren, sterrenstelsels en zwarte gaten ontstaan en wat waren hun eigenschappen (massa, grootte en temperatuur).

## Het LOFAR-EoR experiment

Tot nu toe bestaan er geen directe waarnemingen van reïonisatie. Hierdoor is onze kennis van reïonisatie beperkt en vaag. We denken dat deze ongeveer 500 miljoen jaar na de oerknal, ofwel 13 miljard jaar geleden plaatsvond. Ook al vond reïonisatie 13 miljard jaar geleden plaats, het is nog steeds mogelijk om deze waar te nemen. In de sterrenkunde kunnen we terug in de tijd kijken dankzij het feit dat licht een eindige snelheid heeft. Zo duurt het 8 minuten voordat de zonnestralen hier op aarde aankomen. Dit betekent dat we de zon zien zoals deze er 8 minuten geleden uitzag. Op dezelfde manier kunnen we de signalen van het tijdperk van reïonisatie nu na 13 miljard jaar opvangen.

De uitdijning van het heelal heeft tot gevolg dat de eerste sterren en sterrenstelsels ver van ons verwijderd zijn. Hierdoor zijn hun signalen heel zwak en moeilijk te detecteren. Bovendien moeten we deze sterrenstelsels zoeken door grote delen van het heelal, want we weten vooraf niet waar ze zich bevinden. Een beter alternatief is om naar iets te kijken dat overal bestaat. Waterstof moet overal te vinden zijn, want 75 procent van materie in het heelal bestaat uit waterstof. Bovendien heeft waterstof een uniek kenmerk dat ons laat zien wanneer reïonisatie plaatsvond. Dat kenmerk is de radiostraling met een golflengte van 21 cm. Deze straling wordt alleen door neutrale waterstof uitgestraald. Zodra waterstof geïoniseerd wordt door de eerste sterren, verdwijnt de 21 cm straling.

Stel dat we een speciale bril zouden hebben waardoor we alleen de 21 cm straling konden zien. Vóór de eerste sterren ontstaan, zouden we overal de 21 cm straling van neutrale waterstof kunnen zien. Zodra een ster zich vormt, ioniseert zijn straling materie in zijn omgeving. Hierdoor vormen zich bubbels rond sterren waarin geen neutrale waterstof en dus geen 21 cm straling meer te zien is. Deze bubbel zouden we als een gat in de 21 cm straling zien door onze speciale bril. In de 21 cm straling zal het heelal er hierdoor uit zien als een Zwitserse kaas met gaten. Radiotelescopen kunnen als onze speciale bril werken, in de zin dat ze aan de hand van de radiogolven uit de ruimte in kaart kunnen brengen waar wel en waar geen 21 cm straling is. De 21 cm straling is immers in feite een radiostraling net als signalen van FM radio of mobiele telefoons.

Als we de 21 cm straling door de tijd volgen, kunnen we de formatie van sterren en sterrenstelsels in kaart brengen. Hoe kunnen we echter de 21 cm straling van verschillende tijdperken uit elkaar halen? Wel, dankzij de uitdijing van het universum wordt de golflengte van 21 cm straling uitgerekt, en hoe verder terug in de tijd we kijken hoe langer de golflengte wordt. We kunnen daardoor verschillende tijdperken op verschillende golflengtes of frequenties waarnemen. Net zoals Sky Radio op 101 en Radio 538 op 102 megahertz uitgezonden worden, kunnen we op verschillende frequenties naar verschillende tijdperken in het universum kijken. De nieuwe radiotelescoop LOFAR kan signalen van 100 tot 200 megahertz opvangen. Hiermee kunnen we de periode waarnemen waarin reïonisatie zou hebben plaatsgevonden, namelijk tussen drieduizend jaar en n miljoen jaar na de oerknal. Mijn collegas en ik gebruiken de LOFAR telescoop met de uiteindelijke doelstelling het precieze tijdsverloop van reïonisatie te bestuderen en vast te stellen. Ons project heet het LOFAR Epoch of Reionization experiment. Grafiek 1 laat een luchtfoto van de LOFAR telescoop zien.

## Statistische methoden en de eerste resultaten

De 21 cm straling die tijdens reïonisatie uitgestraald werd, is moeilijk te detecteren. Ten eerste is deze straling heel zwak. Als we een hele nacht met de LOFAR telescoop waarnemen is de ruis die door de telescoop zelf wordt gegenereerd tientallen keren sterker dan de 21 cm straling. Ten tweede moeten we de 21 cm straling isoleren van talloze dichtbij gelegen sterrenstelsels die duizenden keren sterker zijn. In mijn onderzoek heb ik technieken ontwikkeld waarmee we deze problemen kunnen oplossen en de 21 cm straling kunnen detecteren.

De 21 cm straling is zo zwak dat zelfs de grootste telescopen ter wereld er geen beelden van kunnen maken. Ik heb echter een alternatieve methode ontwikkeld om detectie van 21 cm straling mogelijk te maken. In deze methode onderzoek ik de variantie van de straling. De variantie is de mate van variaties of fluctuaties van de straling in de ruimte. In het tweede hoofdstuk van dit



**Figuur 1** – Luchtfoto van de radiotelescoop LOFAR die dichtbij Exloo in Drenthe gelegen is. In dit proefschrift gebruik ik data die met deze telescoop worden waargenomen met het doel reïonisatie te bestuderen.

proefschrift laat ik zien dat deze aanpak twee voordelen heeft: 1) Hoewel het waarschijnlijk onmogelijk is om beelden van de 21 cm straling te maken, zouden we deze in de vorm van variantie toch kunnen detecteren. Hiervoor zouden 600 uur aan waarnemingen met LOFAR genoeg zijn. 1) Op basis van de variantie van de 21 cm straling kunnen we vaststellen wanneer reïonisatie plaatsvond en hoe lang deze duurde. In de beginfase was waterstof en dus 21 cm straling gelijkmatig verdeeld in de ruimte. Zodra de eerste sterren ontstonden, vormden ze bubbels waarin geen 21 cm straling te vinden was. Dit contrast leidde tot een toename in de variantie. Uiteindelijk vormden zich heel veel sterren en ze ioniseerden bijna alle waterstof in het universum. Hierdoor slonk de variantie in de eindfase van reïonisatie. Door de eerste toename en daaropvolgende afname in de variantie te meten, kunnen we het tijdsverloop van reïonisatie vaststellen.

Als volgende stap, heb ik de methode van variantie-analyse op waargenomen data toegepast. Deze poging leidde al snel tot het besef dat de werkelijkheid ingewikkelder was dan gedacht. Een belangrijke hindernis was dat de verwerkte data twee keer meer ruis bevatten dan de berekening voorspelde. Tot onze verbazing was de extra ruis niet te verklaren door overgebleven signalen van dichterbij gelegen sterrenstelsels of effecten van de atmosfeer. Op zoek naar de oorzaak van deze extra ruis kwam ik tot de conclusie dat deze door kalibratie

wordt veroorzaakt. Kalibratie is het ijken van een instrument, waarbij een onbekende hoeveelheid wordt gemeten op basis van een standaard. Men kan de helderheid van een onbekend sterrenstelsel meten door de meetwaarde te vergelijken met een meting van de helderheid van een sterrenstelsel dat al grondig onderzocht is. Weinig sterrenstelsels zijn echter onderzocht op frequenties van 100 tot 200 megahertz, omdat telescopen die op deze frequentie opereren slechts recentelijk zijn gebouwd. Daarom moeten we een model van het heelal maken dat posities, helderheden en vormen van duizenden sterrenstelsels omvat. Dit model is echter niet foutloos door allerlei aannames die we moeten maken. Bovendien bevat het model alleen compacte, heldere bronnen die veel sterker dan de ruis zijn. In dit proefschrift laat ik zien dat de extra ruis veroorzaakt kan worden door kalibratie met een dergelijk incompleet model. Deze ontdekking is cruciaal, niet alleen voor het detecteren van 21 cm straling maar ook voor alle onderzoeksprojecten die zwakke radiosignalen willen detecteren. Het ontdekken van de grondoorzaak van de extra ruis heeft geholpen om een betere kalibratiestrategie te bedenken. Het belangrijkste aspect van onze vernieuwde strategie is dat we, om extra ruis te verminderen, waarnemingen op verschillende frequenties tegelijkertijd kalibreren. Een uitgebreide analyse van de extra ruis is te vinden in het derde hoofdstuk van dit proefschrift.

Ik heb methodes ontwikkeld voor verdere analyse van data om fluctuaties van de 21 cm straling op verschillende schalen te meten. Als proef op de som zijn data van een 13 uur lange waarneming geanalyseerd. Dit leidde tot de eerste resultaten van het LOFAR-EoR experiment, die in het vierde hoofdstuk van dit proefschrift te vinden zijn. De resultaten zijn uitgedrukt in millikelvin, een eenheid van de helderheid van straling. We zijn in staat signalen te detecteren die zo zwak als 80 millikelvin zijn. Om de 21 cm straling te detecteren, moeten we echter nog dieper in de data graven. We verwachten namelijk dat deze op ongeveer 5 millikelvin te detecteren is.

Kunnen we nu, aan het einde van dit proefschrift, de vragen beantwoorden waarmee we zijn begonnen: wanneer ontstonden de eerste sterren en hoe zagen ze eruit? Nee, helaas niet, of misschien moet ik zeggen: nog niet. Desalniettemin reikt dit proefschrift technieken aan die ons gaan helpen om deze vragen in de nabije toekomst te beantwoorden. Met behulp van deze technieken analyseren we nu honderden uren aan waarnemingen, met als ultieme doel de detectie van de kosmische 21 cm straling. De resultaten van dit proefschrift zullen ook van belang zijn om bijvoorbeeld met behulp van de Square Kilometer Array, de grootste radiotelescoop ter wereld (nu nog in aanbouw ) andere zwakke kosmische radiosignalen te kunnen detecteren. Ik verwacht dat we een spannende periode tegemoet gaan met interessante ontdekkingen!

